

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-26-47>
УДК 504.4:551



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Волновые процессы в дрейфующем льду Северного Ледовитого океана в экспедиции MOSAiC. Зимний период

*В.Н. Смирнов**, *М.С. Знаменский*, *И.Б. Шейкин*

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия*

**smirnov@aari.ru*

Резюме

Одной из основных научных и прикладных проблем в Арктике являются исследования физико-механических процессов в системе атмосфера — лед — океан. С этой целью решаются теоретические и экспериментальные задачи. В настоящей работе использовался метод мониторинга состояния дрейфующего льда с помощью автономных сейсмических станций в международной экспедиции MOSAiC в 2019–2020 гг. Метод дистанционной регистрации ледовой информации с дискретностью 100 Гц позволил получить данные о процессах сжатия и торошения льдов различного временного и пространственного масштаба. В работе представлены первые результаты о развитии физико-механических процессов в ледяном покрове при воздействии ветра, океанических гравитационных волн, явлениях сжатия и торошения при крупномасштабных деформациях в дрейфующем льду. Полученные в работе амплитудно-частотные спектры поверхностных гравитационных волн являются основанием относить описанные явления к волнам зыби и инфрагравитационным волнам, возникающим в штормовых районах океанов. Получены новые данные о низкочастотных горизонтально-поляризованных волнах, обусловленных сжатием льдов и подвижками по разрывам в сплоченном ледяном покрове. Рассмотрены возможности использования инструментального мониторинга возникновения и развития приливного сжатия и торошения в дрейфующих льдах Северного Ледовитого океана. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методов прогнозирования состояния льдов в режиме реального времени как в инженерных задачах, так и для совершенствования моделей прогноза погоды и климата.

Ключевые слова: колебания и волны, мониторинг состояния льда, разломы льда, сжатие и торошение.

Для цитирования: *Смирнов В.Н., Знаменский М.С., Шейкин И.Б.* Волновые процессы в дрейфующем льду Северного Ледовитого океана в экспедиции MOSAiC. Зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 1. С. 26–47. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-26-47>.

Поступила 28.09.2021

После переработки 13.01.2022

Принята 15.01.2022

Wave processes in the drifting ice of the Arctic Ocean in the MOSAiC expedition. Winter period

Victor N. Smirnov, Maxim S. Znamensky, Igor B. Sheykin*

*State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia*

**smirnov@aari.ru*

Summary

One of the main directions of theoretical and applied research in the Arctic is the study of physical and mechanical processes in the atmosphere — ice — ocean system. For this purpose, theoretical and experimental problems are solved. The paper employs the method of monitoring the state of drifting ice by means of autonomous seismic stations in the MOSAiC international expedition in 2019–2020. The method of remote registration of ice information with a discreteness of 100 Hz made it possible to obtain data on the processes of compression and crushing of ice of various temporal and spatial scales. The paper presents early findings on the development of physico-mechanical processes in the ice cover under the influence of wind, oceanic gravitational waves, compression and crushing phenomena during large-scale deformations in drifting ice. The amplitude-frequency spectra of surface gravitational waves obtained in this work provide sufficient reason for attributing the phenomena described to swell waves and infra-gravity waves that occur in the stormy areas of the oceans. New data have been obtained on low-frequency horizontally polarized waves caused by the compression of ice and movements along breaks in the cohesive ice cover. The article considers the possibilities of using instrumental monitoring of the occurrence and development of tidal compression and crushing in the drifting ice of the Arctic Ocean. The results obtained can be used to develop methods for predicting the state of ice in real time both in engineering tasks and for improving weather and climate forecasting models.

Keywords: compression and torsion, ice condition monitoring, ice fractures, vibrations and waves.

For Citation: *Smirnov V.N., Znamensky M.S., Sheykin I.B.* Wave processes in the drifting ice of the Arctic Ocean in the MOSAiC expedition. Winter period. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (1): 26–47. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-26-47>.

Received 28.09.2021

Revised 13.01.2022

Accepted 15.01.2022

ВВЕДЕНИЕ

Временные и пространственные масштабы механики деформирования ледяного покрова Северного Ледовитого океана (СЛО) и образование упорядоченных ледовых структур обусловлены развитием целого комплекса динамических процессов в системе атмосфера — лед — океан. Выявление физических связей крупномасштабных процессов в такой геофизической системе необходимо для совершенствования методов прогнозирования сжатия и торошения льдов, образования локальных и протяженных разломов и разводий в ледяном покрове. Результаты инструментальных исследований деформирования и разрушения арктических льдов представлены во многих работах. Подвижки и приливные деформации дрейфующего льда исследовались на российских дрейфующих станциях «Северный полюс» [1]. Механические напряжения в морском льду могут быть показателем приливных явлений в океане [2]. Крупномасштабная механика динамического взаимодействия морских льдов отражена в работах при пространственной расстановке приборов на льду [3, 4]. Пространственные и временные характеристики относительного деформирования дрейфующих льдов рассмотрены в [5]. Перестройка структурных связей в ледяном покрове разного масштаба сопро-

вождается колебаниями и волнами на поверхности океана [6]. Спутниковое изображение блоковой ромбовидной сетки каналов и разводий, а также характер подвижек на большой площади свидетельствуют о проявлении сдвиговых форм разрушения и торошения льда различного пространственно-временного масштаба.

Анализ прочности ледяной пластины и дисперсия изгибно-гравитационных волн отражены в работах [3, 4, 7]. При образовании трещин и разрушении ледяного поля образуется широкий спектр объемных и изгибных колебаний. На записях сейсмометров преобладают вертикальные колебания частиц льда, асимметричные относительно срединной плоскости ледяной пластины. Если энергии в источнике достаточно, чтобы возбудить и гравитационные колебания льда, т. е. колебания совместно с водой, то в результате образуются изгибно-гравитационные волны.

Волны малой амплитуды с периодами 30 с и более могут использоваться для измерения толщины ледяного покрова путем определения времени их прохождения между точками измерений. Океанские волны с такими периодами названы инфрагравитационными волнами, которые генерируются при нелинейном взаимодействии штормовых волн зыби с морским дном шельфовых районов океана [8].

В работах [9, 10] показано, что при сдвиговых напряжениях в ледяном покрове возникают упругие низкочастотные волны. Длительность и интенсивность подвижки с трением по готовому разрыву формируют структуру излучаемых упругих волн. При каждом сдвиге в сплоченном ледяном массиве происходит своеобразный сдвиговый удар по всей длине разрыва. Характер взаимодействия в системе лед — лед определяет спектральный состав возникающих горизонтально-поляризованных колебаний.

Масштабная фрагментация структуры льдов обусловлена циклическими процессами во льду, которые в силу их регулярности поддерживают постоянные состояния разрушения по различным пространственным и временным масштабам. Одним из основных факторов, через которые эти процессы реализуются, являются периодические горизонтальные подвижки льда, особенно проявляющиеся через разномасштабные деформационные процессы и волны в ледяном покрове. С помощью инструментальных наблюдений на дрейфующих станциях «Северный полюс» выявлены процессы периодических горизонтальных смещений в сплоченном ледяном массиве, которые можно представить как крупномасштабные релаксационные автоколебания [10]. Процессы могут длиться несколько часов и состоять из периодических сбросов напряжений с интервалами от единиц до десятков минут.

Одним из сложных вопросов полярной океанологии является создание физико-механической модели поведения морского льда при приливных или инерционных явлениях в СЛЮ. В связи с возникновением эффектов приливного сжатия и генерации упругих и гравитационных волн сейсмометрические измерения на морском льду представляют наиболее точное средство исследования спектра таких волн [2, 3, 11].

Настоящая работа является продолжением научных исследований динамики ледяного покрова и посвящена описанию методики наблюдений и первым результатам по волновым и колебательным явлениям на поверхности СЛЮ в зимний период экспедиции MOSAiC в 2019–2020 гг.

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Для проведения мониторинга динамического состояния дрейфующего ледяного покрова использовался сейсмометрический метод. Для сбора и экспресс-анализа данных использовалась система мониторинга динамики дрейфующего морского

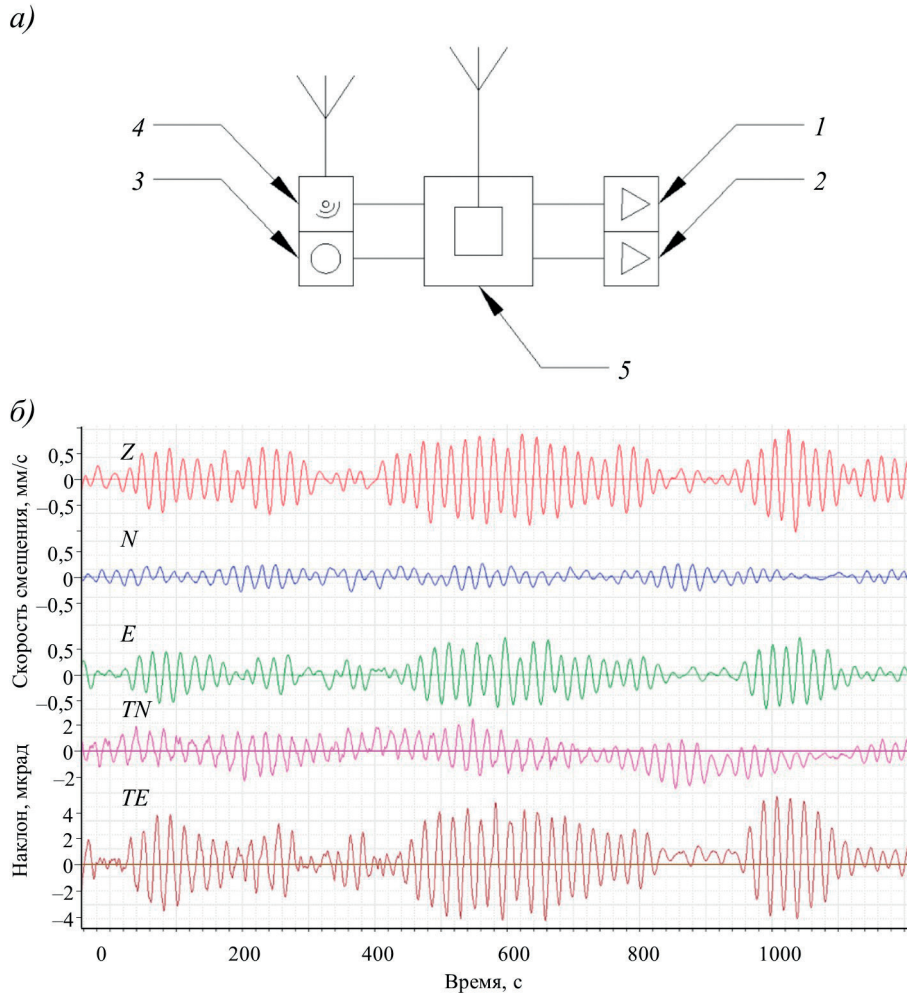


Рис. 1. Блок-схема полевой сейсмостанции (а) и пример записи колебаний дрейфующего ледяного покрова (б).

1 — сейсмометр СМЕ-4311, 2 — наклономер ИН-ДЗ-360, 3 — аккумуляторная батарея, 4 — приемник GPS-сигнала, 5 — модуль оцифровки данных с радиоканалом; Z, N, E — записи от вертикального и горизонтальных компонент сейсмометра; TN, TE — записи от двух компонент наклономера. Станция Бета, 01.11.2019

Fig. 1. Block diagram of a field seismic station (a) and a typical example of recording vibrations of a drifting ice sheet (b).

1 — seismometer СМЕ-4311, 2 — inclinometer ИН-ДЗ-360, 3 — battery, 4 — GPS signal receiver, 5 — data digitization module with radio channel; Z, N, E — records from the vertical and horizontal components of the seismometer; TN, TE is a record from the two components of the tilt meter. Station Beta, 01.11.2019

льда, созданная в ААНИИ [11]. Для регистрации колебаний и волн в системе лед — вода применялись широкополосные трехкомпонентные электронно-молекулярные сейсмометры СМЕ4311 с коэффициентом преобразования 4000 В/м/с. Амплитудно-частотная характеристика сейсмометра СМЕ4311 столообразная в частотном диапазоне 0,0167–50 Гц и с более низкой границей до 0,01 Гц.

Для регистрации наклонов льда в двух горизонтальных координатах использовались наклонометры типа ИН-Д3а-360. Наклономер на выходе имеет сумму показаний в виде ускорений и наклонов. Диапазон измерения наклонов: ± 360 угловых секунд или ± 1746 мкрад; диапазон измерения ускорений: $1,75 \cdot 10^{-2}$ м/с² или 17,5 мм/с² при динамическом диапазоне 60 дБ.

Сейсмометры и наклонометры устанавливались на специально изготовленные постаменты, вмороженные в лед на глубину до 30 см. В самом общем виде для любой пространственной расстановки приборов и безотносительно к направлению распространения волны методика расчета фазовой скорости и азимута определяется по соответствующим методикам [3, 11].

Первичными звеньями системы мониторинга состояния льда являются полевые сейсмические станции сбора данных от присоединенных датчиков — сейсмометров и наклонометров (рис. 1).

Полевые станции сбора данных производят операцию оцифровки данных от датчиков с заданной частотой. Оцифровка данных осуществлялась с помощью высокочастотных 24-битных АЦП типа сигма-дельта в составе системы мониторинга на частоте дискретизации 100 Гц для всех каналов. При этом сбор всех каналов данных на станциях синхронизирован с помощью часов глобальной системы позиционирования. Данные сохраняются в локальном хранилище, а также по радиоканалу передаются на сервер сбора данных базовой станции в режиме реального времени. Каждая полевая станция сбора данных оснащена геопозиционным модулем, который собирает и передает координаты станции через радиоканал. Электропитание всех полевых приборов осуществлялось от аккумуляторных батарей.

Все данные передавались на базовую станцию судна «Поларштерн», состоящую из приемника/передатчика основного радиоканала, вторичного радиоканала для локальной передачи данных между выносным передатчиком основного радиоканала и сервером сбора данных. Сервер сбора данных принимал по радиоканалу данные от полевых станций в режиме реального времени и сохранял их в архиве. Также сервер сбора данных осуществлял вывод получаемых данных на графический дисплей в виде волновых профилей, принимаемых от всех полевых станций с возможностью обработки и выделения интересующей информации.

Применяемая в экспедиции MOSAiC измерительная система с пространственной расстановкой приборов на льду обладает большой емкостью энергонезависимой памяти, модулем GPS для синхронизации сбора сигналов, высококачественными АЦП для оцифровки сигналов, возможностью мониторинга сигналов в режиме реального времени на базовой станции.

На рис. 1б показана типичная запись колебаний в дрейфующем ледяном покрове во время прохождения волн океанской зыби. Зарегистрированы характеристики скорости смещения и записи от наклонометров. Все данные с трех сейсмостанций являются основными для исследования кинематических и динамических свойств дрейфующего льда. В данной статье для выявления локальных особенностей динамики льда использованы первые результаты только одной станции. В дальнейшем планируется каждое событие описать с привлечением данных пространственной расстановки сейсмостанций, использованием синоптической ситуации, описанием относительных деформаций льда и процессов трещинообразования в ледяном покрове.

Круглосуточный мониторинг состояния дрейфующего ледяного покрова сопровождался визуальным осмотром ледяного поля лагеря станции, обнаружением, по возможности, сквозных трещин, подвижек и торошений. Особое внимание уделялось первичным сигналам, возникающим перед сжатием и торошением льдов.

В первичную обработку исходных данных входили следующие этапы:

- построение временных ходов скорости смещений в колебаниях и волнах;
- построение спектров колебательных и волновых процессов методом БПФ;
- построение спектров колебательных и волновых процессов методами непрерывного вейвлет-преобразования;
- построение синхронных с динамикой льда метеорологических характеристик.

Для оценки интенсивности временных рядов вертикальных и горизонтальных колебаний в сравнительно узкополосной части исследовался спектр БПФ в линейном масштабе амплитуды, который дает истинное представление измеренной амплитуды волновых процессов. Тенденция изменчивости волновых процессов определялась также методом непрерывного вейвлет-преобразования, который позволяет построить спектрограмму волнового процесса и получить картину изменения интенсивности различных участков в широком диапазоне частот во времени.

Построение временных рядов производилось с привлечением первичных данных экспедиции и хранящихся в архиве в формате MINISEED. Данные в этом формате хранятся в синхронизированном с UTC времени. Временные профили визуализировались при помощи программы, написанной на языке PYTHON с привлечением ряда библиотек, таких как NUMPY, SCIPY, OBSPY, MATPLOTLIB.

Таким образом, при обработке исходных цифровых материалов наблюдений можно выделять особенности спектров при сопоставлении с метеорологическими ходами ветра, атмосферного давления и температуры воздуха. Построение синхронных метеорологических ходов проводилось на основе стандартных данных метеостанции судна «Поларштерн». Все приведенные выше данные могут быть скомпонованы на единой диаграмме для поиска соответствий и взаимных влияний рассматриваемых физических параметров друг на друга. На временной диаграмме используется единая шкала времени в формате UTC, т. е. все данные измерений являются синхронизированными по времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В экспедиции MOSAiC за все время наблюдений методом сейсмометрии было зарегистрировано несколько ледовых событий, отразивших интенсивную динамику дрейфующего льда. Механика разрушения льда как на уровне локальных сквозных трещин, так и протяженных сдвиговых торошений и образования разветвий может решаться с помощью соответствующих методик определения характеристик упругих и гравитационных волн. На данном этапе мы представляем картину динамики льда с проявлением процессов в системе воздух — лед — вода в первые месяцы экспедиции MOSAiC. Рассмотрим наиболее выраженные в физико-механическом отношении ледовые события из зимнего периода экспедиции: *ноябрь 2019 — март 2020 гг.*

Событие 24 октября — 5 ноября 2019 г. (рис. 2). Первые результаты по динамическим процессам в системе лед — вода были получены в массиве сплоченных однолетних и двухлетних дрейфующих ледяных полей толщиной до 1,5 м.

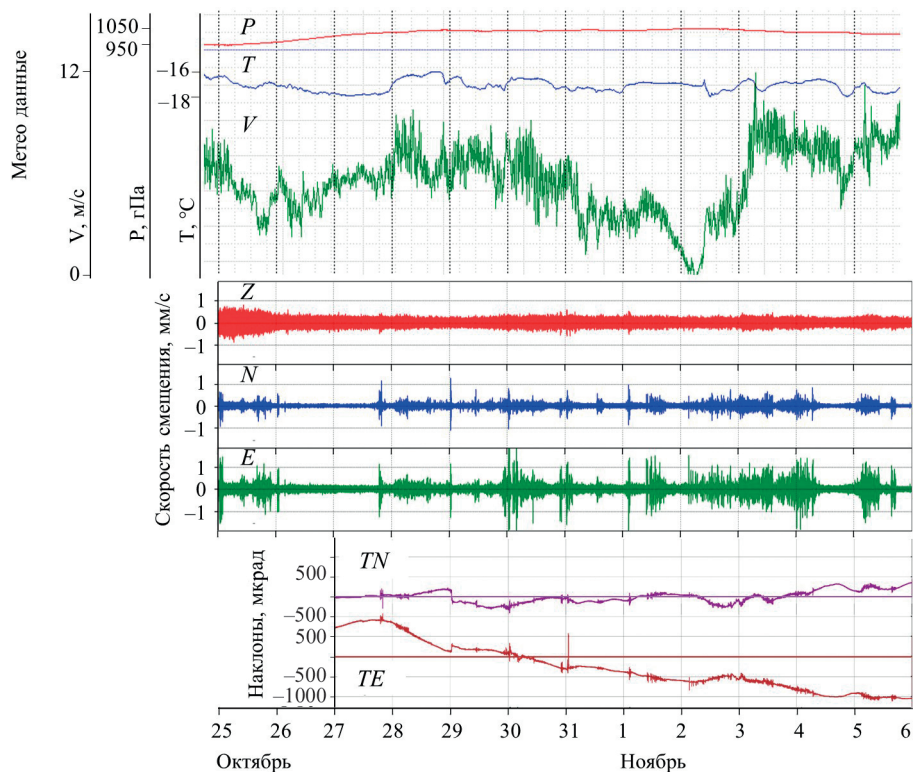


Рис. 2. Временной ход вертикальных и горизонтальных колебаний дрейфующего льда и метеопараметров за период 24.10–05.11.2019.

Z, N, E — записи сейсмометра с вертикальным (красные) и горизонтальными (синие и зеленые) колебаниями льда; *TN, TE* — запись от двух компонент наклономера

Fig. 2. Time course of vertical and horizontal fluctuations of drifting ice and meteorological parameters for the period 24.10–05.11.2019

Z, N, E are records of the seismometer with vertical (red) and horizontal (blue, and green) ice fluctuations, respectively; *TN, TE* is a record from the two components of the tilt meter

На рис. 2 представлен временной ход изменчивости вертикальных и горизонтальных колебаний льда и метеопараметров в начальный период экспедиции. При сравнительно слабых перепадах скорости ветра не отмечается заметной изменчивости амплитуды вертикальных колебаний льда, т. е. визуально на графиках корреляция практически не заметна. В то же время и горизонтальные составляющие колебаний, имея интенсивные сигналы с заметной периодичностью появления, слабо связаны со скоростью ветра.

Наклономеры в рассматриваемом событии имели записи неустойчивого тренда и в отдельные моменты регистрировали горизонтальные импульсы ускорения синхронно с записями сейсмометров. Данные от наклономеров в настоящей работе используются только как вспомогательная информация при рассмотрении влияния на ледяной покров внутренних волн и приливных или инерционных колебаний в океане.

Из графиков рис. 2 видно, что фон вертикальных колебаний льда в течение 20 дней сохранялся постоянным. Эти колебания преимущественно с периодом до

35 с рассматриваются как долгопериодные волновые движения, которые можно отнести к типу инфрагравитационных волн в океане [8, 9]. В дальнейшем подобному явлению будет уделено особое внимание как отклику арктического льда на мощные штормовые процессы в Атлантическом океане при движении циклонов в северо-восточном направлении.

Кроме вертикальных колебаний амплитудный спектр имеет пики горизонтальных сигналов на частотах до 0,01 Гц. Возникновение таких сигналов не связано по времени с вертикальными колебаниями и с метеопараметрами. Природу возникновения горизонтальных колебаний в дрейфующем льду можно рассматривать в связи с образованием протяженных трещин и последующих сдвигов в сплоченном ледяном покрове. Подобные горизонтальные сигналы могут быть комбинацией как локальных подвижек льда, так и масштабных приливных явлений типа баротропных приливных течений и внутренних волн. На данном этапе можно предполагать, что отмеченные на графиках горизонтальные колебательные процессы обусловлены крупномасштабными движениями ледяного покрова, в том числе инерционными колебаниями в океане.

Событие 9–21 ноября 2019 г. На рис. 3 представлены записи вертикальных и горизонтальных колебаний в ледяном покрове в период 9–21 ноября 2019 г. Особенно отмечается изменчивость амплитудного спектра колебаний ледяного покрова за период 11–13 ноября. В спектральном составе колебаний проявляется увеличение частоты в отдельные этапы времени. Это говорит о том, что в эти моменты возникали разрушения льда, сопровождавшиеся излучением изгибно-гравитационных волн на частотах 0,1–0,5 Гц (рис. 3б и 3в).

Следует отметить, что вертикальные колебания с периодом 20–25 с возникали при сравнительно малой скорости ветра 6 м/с. Очевидно, что такая информация указывает на проявление океанских поверхностных волн с периодом до 25 с от далекого циклона и шторма на открытой воде. Из результатов спектрального анализа следует, что за время движения циклона по направлению к дрейфующей станции с 10 по 13 ноября период волны уменьшился на 7,7 с. Согласно графикам рис. 3б с 10 по 13 ноября частота вертикальных колебаний увеличилась с 0,036 Гц до 0,050 Гц, т. е. за 72 ч период колебаний уменьшился с 27,7 до 20 с. Полученная информация может служить для разработки метода определения эпицентра зарождения и распространения гравитационных волн. Важно отметить, что 11 ноября в период 12–18 ч в спектре регистрировался цуг волн, обусловленный воздействием ветра.

При рассмотрении аналогичной картины в период 14–15 ноября получены следующие данные: изменение частоты в пределах 0,042–0,052 Гц, т. е. при почти полном штиле ветра период колебаний за время наблюдений 42 ч уменьшился с 24,8 до 19,2 с.

Особенно интенсивные колебания ледяного покрова отмечались 16 ноября, когда сигналы от всех сейсмометров на ледовом полигоне «зашкаливали» (рис. 3а). При скорости ветра 24 м/с значение скорости вертикальных смещений во льду могло превышать десятки мм/с. Очевидно, что не все вертикальные колебания были вызваны усилением скорости ветра. Например, увеличение вертикальной компоненты 14–15 ноября не связано с ветром. Как покажут данные событий в следующих месяцах мониторинга, колебания в этот период возбуждались волнами зыби от далекого шторма.

События с частотными спектрами колебаний обусловлены как генерацией в ледяном покрове океанских гравитационных волн, так и возникновением локальной механики

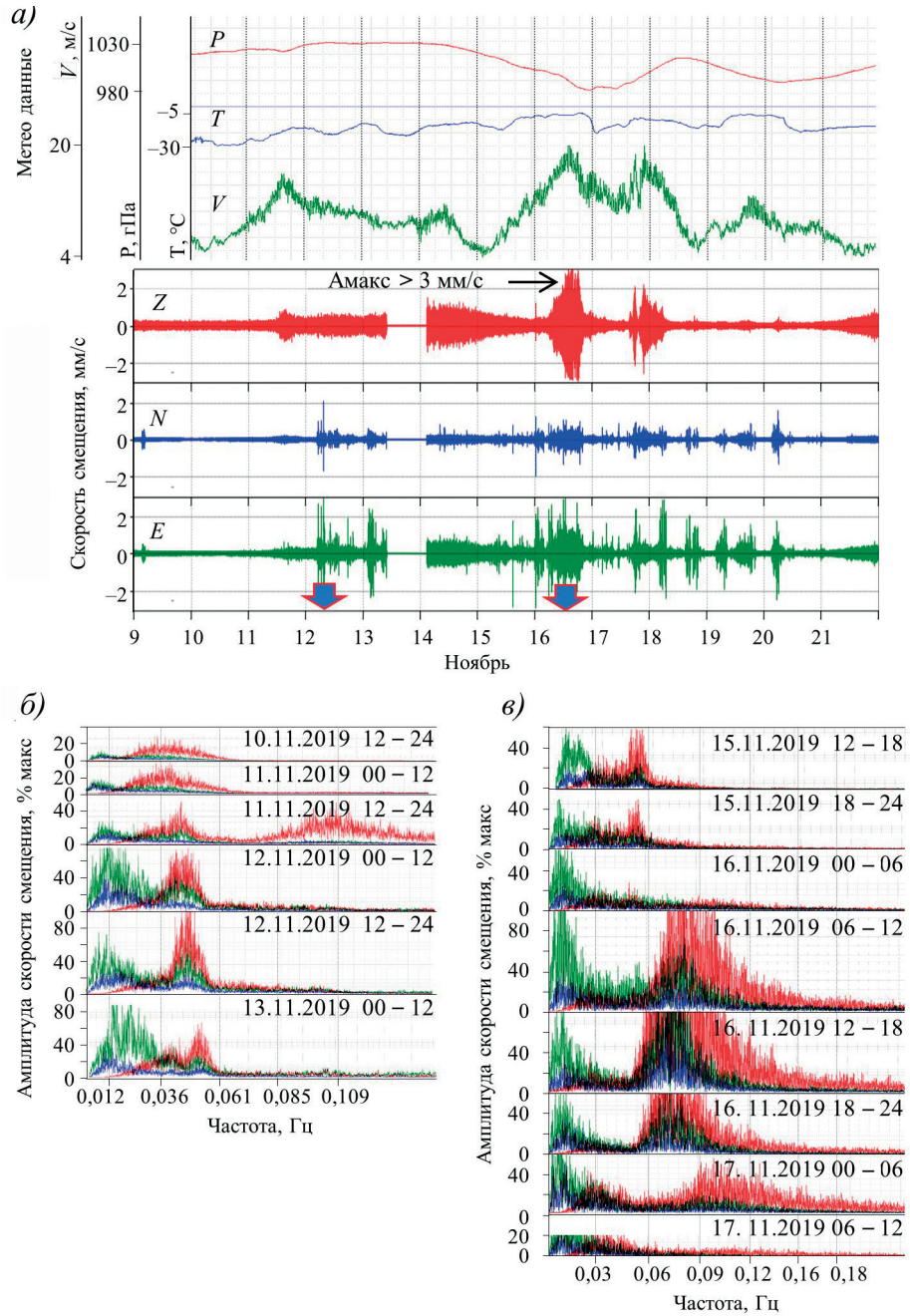


Рис. 3. Общая картина динамических процессов в ледяном покрове за период 9–21 ноября 2019 г.: а — временной ход колебаний льда (Z, N, E); б, в — амплитудные спектры. Стрелки — моменты образования трещин

Fig. 3. General picture of dynamic processes in the ice cover for the period November 9–21, 2019: а — the time course of ice oscillations (Z, N, E); б, в — amplitude spectra. Arrows — moments of crack formation

разрушения льда. Очевидно, что резкий спад амплитуды вертикальных колебаний во второй половине 16 ноября был обусловлен резким падением скорости ветра. Особенно хорошо выражены процессы деформирования льда на рисунках 3а, б, в, когда появляются интенсивные изгибно-гравитационные волны. Показано, что в конце 17 ноября снова возникли волны, указывающие на моменты воздействия ветра с изменчивой скоростью от 10 до 22 м/с. Это типичный случай проявления разлома ледяного поля при совпадении скорости ветра с фазовой скоростью изгибно-гравитационных волн, т. е. возникновении резонанса скоростей.

За весь период наблюдений 9–20 ноября интенсивность естественного фона вертикальных колебаний несколько уменьшилась, частота при этом оставалась постоянной на уровне 0,03 Гц, т. е. период фоновых гравитационных колебаний составлял около 30 с.

Как уже отмечалось, кроме вертикальных колебаний на записях сейсмометров и наклономеров появляются периодические горизонтальные цуги колебаний. Особенно подобное явление было заметным в период 17–20 ноября. На данный момент мы предполагаем, что эти процессы обусловлены локальными и/или протяженными периодическими сдвигами во льду, обусловленными приливными или инерционными движениями ледяного покрова. Периодические горизонтальные цуги с проявлениями почти полусуточного механического сплочения ледяных полей являются косвенными признаками возникновения процессов сжатия и торошения во льдах. Приливные сплочения и разрежения сопровождаются взаимодействием ледяных полей, образованием протяженных сдвигов с моментами торошения и образования гряд торосов. Все эти динамические процессы порождают комплекс упругих и гравитационных волн непосредственно в среде лед — вода. Судя по графикам рис. 3а (17–20 ноября), длительность приливного сжатия может составлять 3–5 ч. Это явление отклика льда на приливные процессы в океане можно назвать «эффектом приливного сжатия». Подобные результаты, как уже указывалось во введении, имеются в работах [2, 4, 11]. Очевидно, что события ноября 2019 г. с привлечением дополнительных данных по метеорологии, океанологии и спутниковым снимкам льда дадут более полную информацию о механизме крупномасштабной механики ледяного покрова в системе атмосфера — лед — океан.

Событие 22–27 декабря 2019 г. (рис. 4). Данное событие отмечалось цугом интенсивных вертикальных колебаний при относительно слабом ветре. На рис. 4а примерно в течение 50 ч отмечены два волновых поля (1 и 2) с изменяющимися периодами колебаний в диапазоне от 30 до 20 с (назовем такой спектр — «циклонический портрет»). В интервале времени несколько часов диапазон периодов вертикальных колебаний в цуге волн составлял 18–26 с. Это говорит о том, что по мере распространения цуга гравитационной волны его амплитуда уменьшалась, а спектр трансформировался до периодов 18–20 с.

Из спектров на рис. 4а и 4б видно, что за двое суток существования колебаний частота пиков уменьшилась с 0,048 до 0,032 Гц, т. е. в течение 50 ч произошло изменение частоты колебаний на 0,016 Гц. Этот факт позволяет связывать цуги вертикальных колебаний с циклонической деятельностью и оценивать расстояние до источника гравитационных волн. Рассмотренные фоновые события демонстрируют пример, когда на больших расстояниях от источника происходит генерация колебаний, регистрируемых на станции с частотой до 0,036 Гц и менее. Можно

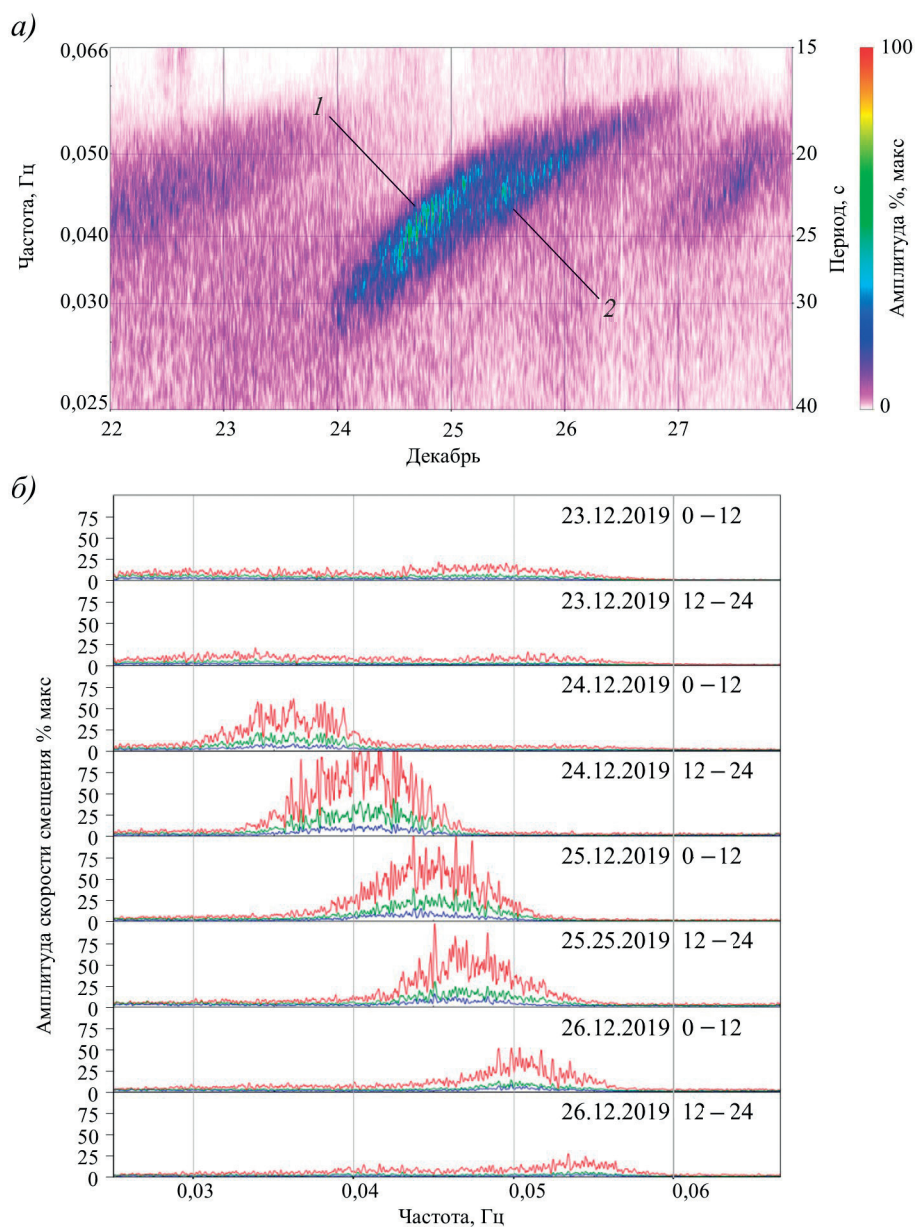


Рис. 4. Динамическое событие с интенсивным цугом поверхностных гравитационных волн в период 22–27.12. 2019.

Спектр непрерывного вейвлет-преобразования: *a)* — «портреты» двух циклонов (*1* и *2*); *б)* — серия спектров Фурье

Fig. 4. Dynamic event with an intense arc of surface gravitational waves in the period 22–27.12.2019. The spectrum of the continuous wavelet transform: *a)* — “portraits” of two cyclones (*1* and *2*); *б)* — Fourier spectra series

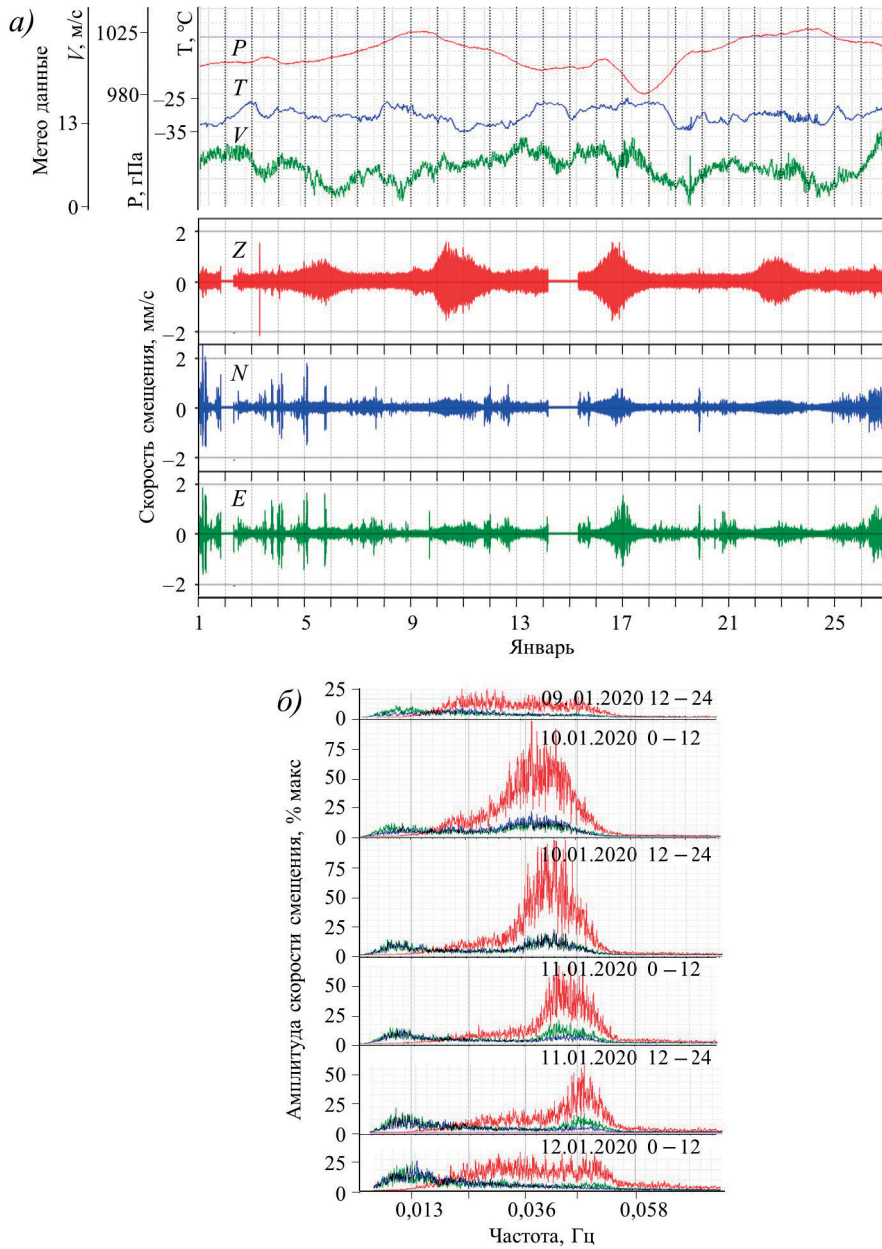


Рис. 5. Общая картина изменчивости колебаний в дрейфующем ледяном покрове за период 1–27.01.2020.

a) — временной ход колебаний льда (Z, N, E); б) — серия амплитудных спектров

Fig. 5. The general picture of the variability of fluctuations in the drifting ice cover for the period 1–27.01.2020.

a) — the time course of (Z, N, E); б) — a series of spectra

предположить, что на фоне существующих в океане инфрагравитационных волн могут возникать волны зыби от движущегося циклона со штормом на открытой воде на расстоянии 2–3 тысячи километров. Такое сочетание инфрагравитационных волн и приближающегося к дрейфующей станции циклона создает волновое поле, способное разрушить лед без видимых признаков внешнего воздействия. Приближение циклона к станции отмечается увеличением частоты волны, т. е. появлением дисперсионных волн штормовой зыби с периодом более 13 с. Если при этом отмечаются волны с более высокой частотой, то это является признаком зарождения трещин, локальных очагов разрушения льда и излучения изгибно-гравитационных волн с частотой менее 0,10 Гц.

К описанию спектров следует сделать следующее замечание. На рисунке 4а цифрами 1 и 2 отмечены два волновых поля, или два «портрета циклонов». Очевидно, что их образование связано с динамикой циклонов 24 и 25 декабря. Максимальные пики интенсивности колебаний отстоят друг от друга на 24 ч. Естественно, что необходимо в дальнейшем рассматривать зависимость частота-время для каждого события 1 и 2 отдельно, с привлечением карт одновременного движения двух циклонов по направлению к дрейфующей станции.

Событие 1–27 января 2020 г. На рис. 5 представлена общая картина изменчивости амплитуды колебаний в дрейфующем ледяном покрове за январь 2020 г. На уровне спокойного фона колебаний было зарегистрировано 4 цуга вертикальных колебаний льда с промежутками 4–6 дней (5, 10, 17 и 22 января). Можно видеть, что эти цуги слабо связаны со скоростью ветра. Важной особенностью графика являются горизонтальные колебания, по интенсивности не всегда сравнимые с цугами вертикальных колебаний, например, 10 и 16 января.

Для выявления механики подобных эффектов и источников колебаний на рис. 5б показан спектр одного из ярко выраженных событий 9–12 января. В спектре показана изменчивость амплитуд вертикальных и горизонтальных колебаний с пиками на периодах: вертикальные 30–20 с, горизонтальные колебания значительно слабее с периодом до 100 с. Визуально связи вертикальных колебаний льда с горизонтальными колебаниями и локальными метеоданными не отмечается. Однако в течение 9–12 января период волны уменьшился на 4–5 с. Аналогичная ситуация происходила 5, 15 и 23 января 2020 г. Видно, что повторяется картина с подобными характеристиками волновых явлений, как и в предыдущих событиях ноября и декабря 2019 г. На фоне инфрагравитационных волн вырастают цуги гравитационных волн от движущегося циклона.

Событие 16–18 февраля 2020 г. (рис. 6). Это событие очень похоже на динамический процесс, наблюдавшийся 16 ноября 2019 г. (см. рис. 3). Также происходило зашкаливание сейсмометров 16–17 февраля 2020 г. На записях самого начала интенсивных колебаний цуги гравитационных волн достигали максимума амплитуд более 5 мм/с. Не отмечалось уверенной связи колебаний со скоростью ветра, в течение нескольких часов наблюдался плавный рост колебаний, затем продолжительное зашкаливание и, наконец, плавное затухание (рис. 6а).

Рассмотрим спектральный состав процессов 16–17 февраля с применением вейвлет-преобразования (рис. 6б). Вся энергия колебаний оказалась расположенной в диапазоне частот 0,030–0,048 Гц. В течение 15–18 февраля отмечается увеличение частоты колебаний, или уменьшение периода волны. Скорость ветра составляла 5 м/с. Очевидно, что этот цуг колебаний является океанической гравитационной волной.

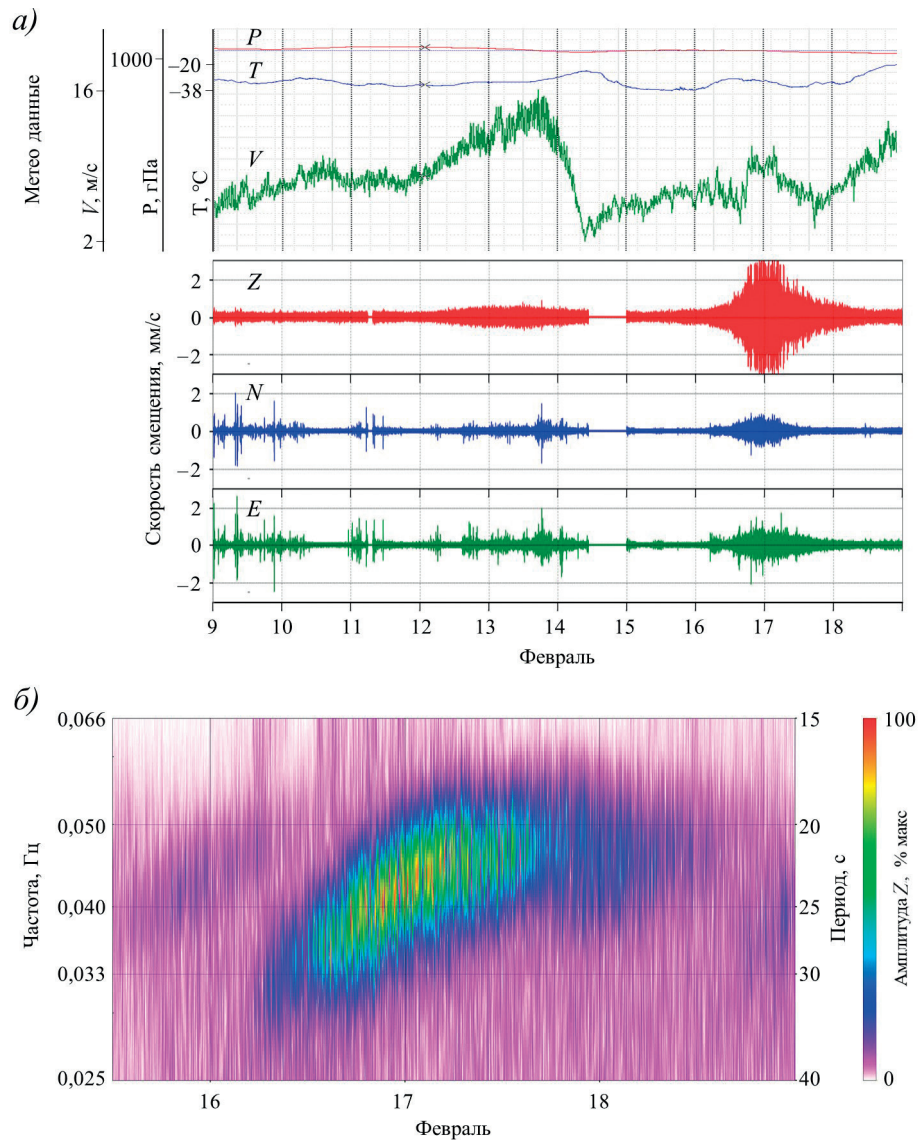


Рис. 6. Динамическое событие с интенсивными поверхностными гравитационными волнами в дрейфующем ледяном покрове в период 9–18.02.2020.

а) — временной ход (Z, N, E); б) — спектр непрерывного вейвлет-преобразования («портрет» циклона) за период 16–18.02.2020

Fig. 6. Dynamic event with intense surface gravitational waves in the drifting ice cover in the period 9–18.02.2020.

а) — the time course of Z, N, E; б) — the spectrum of continuous wavelet transformation (portrait of a cyclone) for the period 16–18.02.2020

В «портрете циклона» выделяются точки, амплитуда в которых достигает 5 мм/с и более. Кроме того, отмечаются периодические, с интервалом 30–60 минут как максимальные амплитуды вертикальных колебаний, так и увеличение частоты гравитационных океанических волн. Можно предположить, что во время пиков максимальных значений спектра происходили разрушения льда, т. е. от 16 февраля 18 час до 17 февраля 06 час. В событии 16–17 февраля вместе с основным энергонесущим пиком на частоте 0,04 Гц возникали пики на частоте 0,12–0,13 Гц (на рис. 6 не отмечено). Это указывает на очевидность трещинообразования и возникновения объемных и изгибных волн в момент локального разрушения льда в районе лагеря станции. Анализ временных рядов колебаний во льду в разных частотных полосах позволяет выявлять детали процесса трещинообразования и разрушения льда. Можно утверждать, что в событии 16–17 февраля основным «виновником» разрушения льда являлся цуг океанической гравитационной волны с периодом 25–27 с. Это важный факт для понимания механики разрушения ледяных полей при незначительной скорости ветра и отсутствии резонансного эффекта. (Визуальное описание разрушения льда сделано многими участниками экспедиции, а также зафиксировано в вахтенном журнале судна.)

События в марте 2020 г. Конец зимнего этапа наблюдений отметился похожими событиями, на основе которых можно создавать модели явлений в зимний период экспедиции. Графики временных ходов динамических процессов характеризовались строгой периодичностью, очевидно, связанной с зарождением циклонов и штормами в океане, распространением океанской зыби и существованием фоновых инфрагравитационных волн (рис. 7). Начало событий в период 1–5 марта отмечено интенсивным цугом вертикальных колебаний при слабой скорости ветра, т. е. очевидно, что это событие не ветрового происхождения. Как и в предыдущих примерах, данное событие могло возникать от далекого движущегося циклона с волнами зыби на фоне долгопериодных инфрагравитационных волн. Основной пик колебаний в рассматриваемый период отмечен на частоте 0,030 Гц.

Особое событие с разрушением льда произошло в период 10–13 марта при относительно слабом ветре на фоне вертикальных колебаний с таким же периодом около 30 с (рис. 7б).

Согласно амплитудным спектрам, общий фон инфрагравитационных колебаний на поверхности океана оставался постоянным в течение всего марта 2020 г. Четкий и постоянный пик колебаний на частоте 0,03 Гц позволяет сделать предположение о природе зарождения и длительного существования этих волн. Очевидно, что этот фон колебаний может быть обусловлен воздействием атмосферных процессов на поверхность океана и проявлением динамики штормов. Инфрагравитационные волны прямо не зарождаются в штормовом районе. Мощные штормовые волны в виде зыби вначале перемещаются к шельфовым наклонным побережьям, где может происходить нелинейное взаимодействие с излучением инфрагравитационных волн. Наблюдения в марте 2020 г. отмечались постоянным уровнем инфрагравитационных волн и эпизодическими цугами волн зыби от динамичных циклонов.

В отдельные моменты усиление скорости ветра привело к разрушению льда и, соответственно, возникновению изгибно-гравитационных колебаний на частотах 0,08–0,15 Гц. Из полученных данных следует, что ветер со скоростью до 20 м/с порождал изгибно-гравитационные волны в диапазоне периодов 5–12 с. Это одно из событий, когда мог образоваться резонансный эффект при совпадении скорости ветра

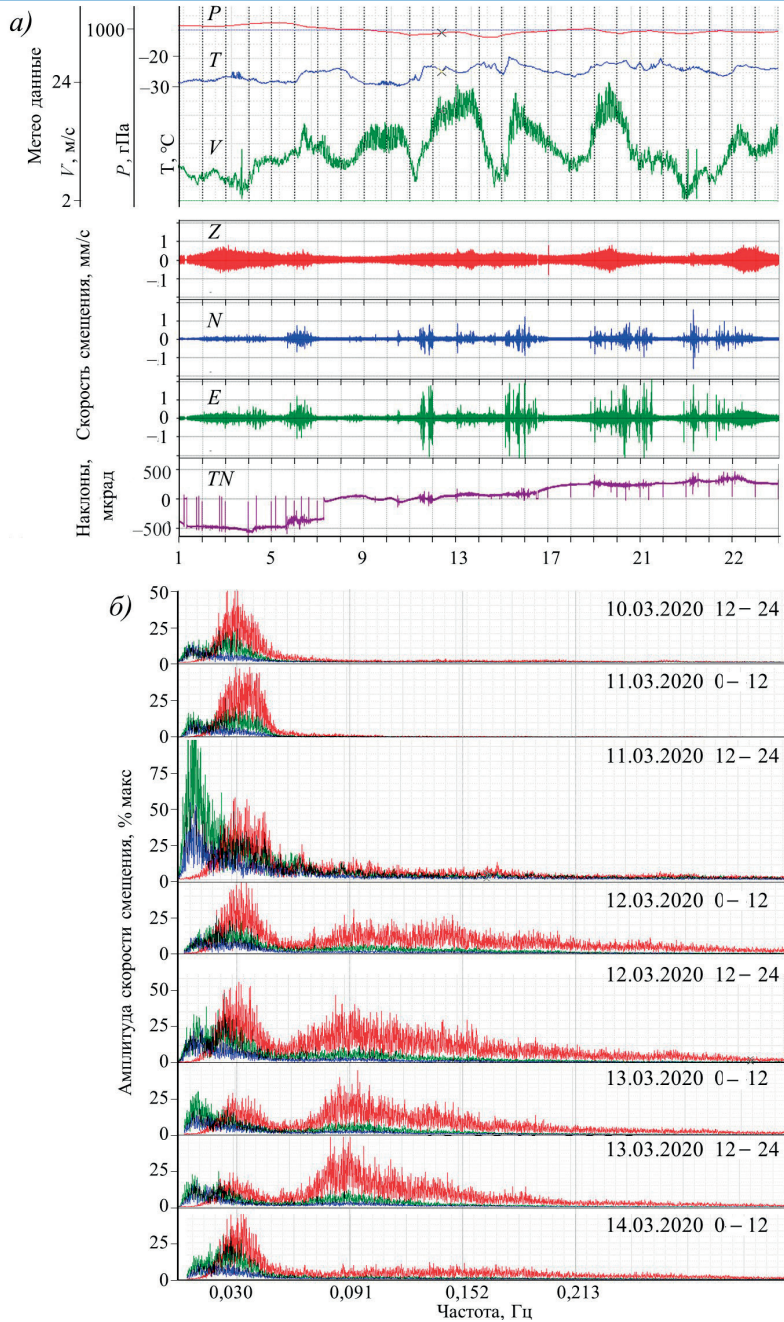


Рис. 7. Колебательные и волновые процессы в ледяном покрове за период 1–26 марта 2020 г. а) — временной ход скорости смещения (Z, N, E), наклоны льда (TN); б) — амплитудный спектр инфрагравитационных волн и изгибных колебаний при разрушении льда

Fig. 7. Oscillatory and wave processes in the ice cover for the period March 1–26, 2020.

а) —the time course of the displacement velocity Z, N, E; ice slopes (TN); б) — the amplitude spectrum of infra-gravitational waves and bending vibrations during the destruction of ice

и минимума фазовой скорости изгибно-гравитационных волн для данной толщины льда. Приведенные случаи создают предпосылки для возникновения предельной деформации изгиба ледяного поля и его разлома. Расчет напряжений при большой крутизне волны, т. е. при максимальной амплитуде и малой длине волны, позволяет утверждать, что основной механизм разрушения ледяного поля 12–13 марта был обусловлен изгибными деформациями ледяной пластины.

Горизонтальные колебания чередовались с некоторой периодичностью и независимо от метеоданных и от вертикальных цугов во льду. Этот факт указывает на возникновение явления излучения упругих волн при подвижках в сплоченном ледяном покрове.

Сочетание природных факторов — воздействие ветра, инфрагравитационных волн, волн зыби и приливных колебаний — привело к тому, что мартовские периоды были для льда одними из самых разрушительных. Эти процессы фиксировались также радиолокационной съемкой с судна «Поларштерн».

Важно отметить, что в мартовских событиях не отмечалось увеличение частоты гравитационных колебаний льда со временем, период которых был постоянным, около 30 с. Дисперсионный характер волн в период 10–14 марта не проявлялся, что позволяет предположить, что движения циклонов в данный период времени по направлению к дрейфующей станции не отмечалось, а пространственные масштабы района зарождения инфрагравитационных колебаний и их распространение имели геофизический масштаб.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Волновые процессы в морском льду являются одним из этапов динамической жизни ледяного покрова и рассматриваются как важные натурные данные для совершенствования моделей временного и пространственного масштаба процессов в системе атмосфера — лед — океан. В экспедиции MOSAiC динамические процессы регистрировались с помощью расстановки автономных сейсмических станций на льду с дискретностью отсчета 0,01 с. Это позволяло получать информацию о развитии физико-механических процессов в ледяном покрове при различных гидрометеорологических условиях. При этом во льду возникал широкий спектр волновых и колебательных процессов: от акустического диапазона трещинообразования до косвенных признаков колебаний в океане планетарного характера с периодами до 100 с и более.

Волновые спектры с периодами вертикальных колебаний 10–12 с характеризуют известное явление резонанса скоростей изгибно-гравитационных волн и ветра, при котором следует ожидать максимальные изгибные напряжения и, соответственно, механическое разрушение льда. Таким образом, можно контролировать время появления экстремальных ледовых событий, когда деформации при изгибе ледяного поля могут достигать разрушающих напряжений. В экспедиции MOSAiC в различные периоды зарегистрированы уникальные события разрушения льда гравитационными волнами, когда в условиях слабого ветра отмечались вертикальные колебания с элементами механики разрушения.

Известно, что приливные или инерционные колебания в СЛО, сопровождающиеся сплочением и разрежением льдов, могут совместно с ветром и течениями создавать периодические сжатия и торошения, образуя гряды торосов и разводья. В арктических льдах такие приливные процессы создаются в основном градиен-

тами приливного течения, передающими силовое воздействие ледяному покрову через касательные напряжения на границе лед — вода. Так же, как и в экспедиции ААНИИ «ТРАНСАРКТИКА-2019», длительность возможных приливных процессов с возникновением различного типа колебаний и волн составляла 3–5 часов. Отмечается синхронная регистрация сигналов с преимущественно горизонтальной направленностью на трех разнесенных на льду сейсмостанциях, в то время как вертикальные колебания в этот же период слабо выражены. Следует отметить, что это одна из приоритетных задач физики и механики приливных или инерционных явлений, которые могут успешно решаться на поверхности океана, покрытого льдом.

Полученная за зимний период наблюдений экспедиции MOSAiC статистика явлений сжатия и торошения во льдах указывает на процессы деформирования и разрушения льда от воздействия ветра, от океанических гравитационных волн, а также от возможных явлений приливного характера. Особенно это касается природы образования упорядоченной/блоковой структуры ледяного покрова. Перекрещивающиеся на спутниковых изображениях морского льда трещины и разводья указывают на вероятность образования относительно быстрых деформаций на больших площадях поверхности океана. Это, в свою очередь, может порождать упругие волны в среде лед — вода — морское дно.

Имеются натурные исследования, где показано влияние приливных явлений на напряженное состояние льда. В записях датчиков напряжений во льду выявлены спектральные пики напряжений с периодами от 11,9 час до 12,4 час величиной до 50 кПа. Авторы [2] указывают, что эти пики обусловлены приливным или инерционным воздействием на лед. Незначительная величина напряжений во льду во время таких крупномасштабных процессов позволяет сделать предположение о сравнительно низком уровне напряженного состояния ледяного покрова. Сочетание предельно напряженного состояния льда, приливных и инерционных эффектов, а также реализация напряжений через трещины и автоколебания на значительных площадях создают высокоорганизованную динамику, которая приводит к появлению упорядоченной ромбовидной структуры ледяного покрова [6].

Выявленные особенности связи колебательных процессов с метеорологическими характеристиками указывают на характер распространения гравитационных волн с периодами до 30 с и более. Спектры океанских волн позволяют относить эти явления к инфрагравитационным волнам, порождаемым нелинейными взаимодействиями между штормовыми волнами зыби и морским дном [8, 9]. Взаимодействие интенсивных океанских штормовых волн с береговыми линиями шельфа приводит к возникновению уникального явления инфрагравитационных волн.

События 16 ноября и 23–26 декабря 2019 г. являются ярким примером явления дисперсии поверхностных волн в океане, когда на больших расстояниях от источника происходит увеличение длины и скорости волны. Изменчивость фона инфрагравитационных волн может служить предвестником зарождения волн зыби от движущегося со штормами циклона. Такое сочетание инфрагравитационных волн и приближающегося к дрейфующей станции циклона создает волновое поле, способное разрушить лед без видимых признаков внешнего воздействия. Приближение циклона к станции отмечается увеличением частоты колебаний или уменьшением периода волны, т. е. появлением волн штормовой зыби. Если при этом отмечаются волны с меньшим периодом, то это означает, что возникают изгибно-гравитацион-

ные волны с частотой 10–0,1 Гц, являющиеся показателями зарождения трещин и локальных очагов разрушения льда.

Таким образом, зимняя статистика циклонических проявлений волн во льду позволяет говорить о явлении возрастания в гравитационной волне частоты со временем. Точное время прибытия данной частоты внутри 12-часового временного ряда определяется из спектрального анализа участков длинных рядов наблюдений. Как правило, при интенсивном событии начальные вступления имеют частоту около 0,03 Гц, затем идет возрастание интенсивности и частоты. К концу цуга на уровне фона колебаний волна имеет частоту около 0,07 Гц. Графики несут дисперсионный характер волн, прибывающих от далеких штормовых событий. Для определения расстояния до источника волн можно использовать наблюдаемые в спектре соотношения частота – время [9]:

$$x = (g/4\pi f)(t - t_0),$$

где x — расстояние до источника, g — ускорение свободного падения, f — наблюдаемая пиковая частота, t — время наблюдения, t_0 — время появления волн. Проведенные расчеты расстояния источника океанических волн составляли тысячи километров [9]. Полученные в экспедиции MOSAiC данные об уменьшении частоты гравитационной волны со временем в диапазоне 0,048–0,032 Гц могут способствовать определению расстояния до источника поверхностных гравитационных волн. В дальнейшем подобные данные и расчеты с использованием карты движения наблюдаемых циклонов позволят совершенствовать модели прогнозирования процессов в системе атмосфера — лед — океан.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты мониторинга динамического состояния льда в экспедиции MOSAiC позволяют сделать первые выводы.

В течение нескольких месяцев получены натурные данные с помощью расстановки сейсмостанций на дрейфующем ледяном покрове СЛО. Описаны методы полевых дистанционных наблюдений и обработки исходных данных с применением спектрального анализа колебательных процессов в ледяном покрове. Выявлен широкий спектр волновых процессов, обусловленных динамическими явлениями в системе атмосфера — лед — океан.

Спектры вертикальных колебаний морского льда позволяют относить описанные явления к поверхностным гравитационным волнам океана. Существующие модели зарождения и распространения волн зыби и инфрагравитационных волн использованы для описания колебательных и волновых процессов на поверхности океана, покрытого льдом. Известно, что в открытом океане штормовая зыбь на первом этапе перемещается к шельфовым наклонным побережьям, где может происходить нелинейное взаимодействие с образованием инфрагравитационных волн, распространяющихся до кромки арктических льдов и далее в сплошном ледяном покрове. Полученные нами результаты в настоящее время не дают полной уверенности в том, что гравитационные волны с периодами до 40 с имеют соответствующее происхождение. Необходима постановка исследований в расширенном временном и пространственном масштабах, т. е. использование приборов для регистрации колебаний поверхности океана с периодами до сотен секунд на пространствах десятки-сотни километров.

Получены новые данные о низкочастотных колебаниях во льду, которые можно отнести к горизонтально-поляризованным волнам типа SH. Имеющиеся в литературе сведения о природе происхождения таких колебаний обусловлены сжатием льдов и подвижками по разрывам в сплоченном ледяном покрове. Сложно оценить параметры волны из-за малого расстояния между сейсмостанциями на льду. Зарегистрированные периоды горизонтальных колебаний составляли десятки секунд, и при дальнейших исследованиях необходимо организовывать схему наблюдений по треугольнику со сторонами десятки километров.

Рассмотрены возможности использования инструментального мониторинга возникновения и развития приливного сжатия и торошения в дрейфующих льдах СЛО. Первые результаты позволяют найти подходы к решению задач о механике деформирования льда и масштабах волновых полей при приливных или инерционных явлениях в океане. Очевидно, что выявление физической природы описанных процессов и их масштабов могут быть одной из приоритетных задач полярной океанологии.

Сейсмометрические методы, обладая беспрецедентным временным разрешением, позволяющим изучать динамические процессы с дискретностью отсчета 0,01 с в морском дрейфующем льду, представляют собой одно из основных средств исследования широкого спектра колебаний и волн при сжатии и торошении, при воздействии поверхностных и внутренних гравитационных волн на лед, при приливном и/или инерционном движении льдов.

Представленное описание методов исследования в зимний период и первые результаты в экспедиции MOSAiC дают возможность изучать ледовые явления в системе атмосфера — лед — океан в широком временном и пространственном масштабах. Комплексные результаты мониторинга состояния дрейфующего ледяного покрова с привлечением данных по метеорологии, океанологии и спутниковым снимкам льда будут способствовать совершенствованию физико-механических методов и моделей прогнозирования экстремальных природных явлений в Арктике. Стандартные данные метеостанции судна «Поларштерн» были успешно использованы при обработке материалов сейсмических наблюдений [12].

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы 5.1.5 ЦНТП Росгидромета «Исследование крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов с целью совершенствования методов краткосрочного прогнозирования сжатия и торошения».

Данные, использованные в этой статье, были получены в рамках международной многопрофильной дрейфующей обсерватории по изучению арктического климата (MOSAiC) с пометкой MOSAiC20192020. Идентификатор экспедиции AWI_PS122 00.

Funding. The work was carried out within the framework of the topic 5.1.5 of the Central Research Institute of Roshydromet “Research of large-scale dynamics, physical processes, mechanics of deformation and destruction of sea ice in order to improve methods of short-term forecasting of compression and ridging”.

The data used in this manuscript was produced as part of the international Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of the Arctic Climate (MOSAiC) with the tag MOSAiC20192020. Project_ID given for this specific Polarstern expedition is AWI_PS122 00

Благодарности. Стандартные данные метеостанции судна «Поларштерн» были успешно использованы при обработке материалов сейсмических наблюдений. Статья написана на основе данных инструментальных измерений, проведенных сотрудниками Лаборатории физики льда ААНИИ Николаем Колабутиным, Егором Шеманчуком, Игорем Шейкиным и Алексеем Ньюбом.

Acknowledgments. The standard data of the Polarstern weather station was successfully used in the processing of seismic observation materials. The article is based on the data of instrumental measurements carried out by employees of the AARI Laboratory of Ice Physics Nikolai Kolabutin, Egor Shemanchuk, Igor Sheikin and Alexey Nyubom.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Легеньков А.П.* Подвижки и приливные деформации дрейфующего льда. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 104 с.
2. *Tucker III W.B., Perovich D.K.* Stress measurements in drifting Pack Ice // Cold regions science and technology. 1992. V. 20. № 2. P. 119–139. doi: 10.1016/0165-232X(92)90012-J.
3. *Смирнов В.Н.* Динамические процессы в морских льдах. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 162 с.
4. *Aksenov Ye.* Local scale deformations and stresses, and their relationship to the mesoscale ice internal stress field // Ice State final report. Helsinki Univ. of Technology. HUT, 1999. P. 100–148.
5. *Hutchings J.K., Roberts A., Geiger C.A., Richter-Menge J.* Spatial and temporal characterization of sea-ice deformation // Ann. Glaciol. 2011. V. 52. P. 360–368. doi: 10.3189/172756411795931769.
6. *Смирнов В.Н., Чмель А.Е.* Самоподобие и самоорганизация в дрейфующем ледяном покрове Арктического бассейна // Доклады Академии наук. 2006. Т. 5. С. 684–687. doi: 10.1134/S1028334X06080204.
7. *Marchenko A., Morozov E., Muzylev S.* Measurements of sea-ice flexural stiffness by pressure characteristics of flexural-gravity waves // Ann. Glaciol. 2013. V. 54 (64). P. 51–60. doi: 10.3189/2013AoG64A075.
8. *Wadhams P., Doble M.J.* Sea ice thickness measurement using episodic infragravity waves from distant storms // Cold Reg. Sci. Technol. 2009. V. 56. P. 98–101. doi: 10.1016/j.coldregions.2008.12.002.
9. *Marsan D., Weiss J., Moreau L., Gimbert F., Doble M., Larose E., Grangeon J.* Characterizing horizontally-polarized shear and infragravity vibrational modes in the Arctic sea ice cover using correlation methods // J. Acoust. Soc. Am. 2019. V. 145 (3). P. 1600–1608. doi: 10.1121/1.5094343. doi:10.1121/1.5094343.
10. *Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Ньюбом А.А.* Автоколебания в дрейфующем ледяном покрове Северного Ледовитого океана // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 3. С. 122–138. doi: 10.29006/1564–2291.JOR–2019.47(3).11.
11. *Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Ньюбом А.А., Знаменский М.С.* Механика колебаний и волн во льдах Северного Ледовитого океана при явлениях сжатия и торошения // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 3. С. 321–336. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-321-336.
12. *Schmithüsen H.* Continuous meteorological surface measurement during POLARSTERN cruise PS122/4. 2021. URL: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.935224> (дата обращения 04.04.2022).

REFERENCES

1. *Legen'kov A.P.* *Podvizhki i prilivnye deformatsii dreifuiushchego l'da.* Shearings and tidal deformations of drifting ice. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988: 104 p. [In Russian].
2. *Tucker III W.B., Perovich D.K.* Stress measurements in drifting pack ice. Cold regions science and technology. 1992, 20 (2): 119–139. doi: 10.1016/0165-232X(92)90012-J.

3. *Smirnov V.N. Dinamicheskie protsessy v morskikh l'dakh.* Dynamical processes in sea ice. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1996: 162 p. [In Russian].
4. *Aksenov Ye.* Local scale deformations and stresses, and their relationship to the mesoscale ice internal stress field. Ice State final report. Helsinki Univ. of Technology., HUT, 1999: 100–148.
5. *Hutchings J.K., Roberts A., Geiger C.A., Richter-Menge J.* Spatial and temporal characterization of sea-ice deformation. *Ann. Glaciol.* 2011, 52: 360–368. doi: 10.3189/172756411795931769.
6. *Smirnov V.N., Chmel' A.E.* Self-similarity and self-organization in drifting ice cover of the Arctic basin. *Doklady Akademii nauk.* Proc. of the Academy of Sciences. 2006, 5: 684–687. doi: 10.1134/S1028334X06080204. [In Russian].
7. *Marchenko A., Morozov E., Muzylev S.* Measurements of sea-ice flexural stiffness by pressure characteristics of flexural-gravity waves. *Ann. Glaciol.* 2013, 54(64): 51–60. doi: 10.3189/2013AoG64A075.
8. *Wadhams P., Doble M.J.* Sea ice thickness measurement using episodic infragravity waves from distant storms. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2009, 56: 98–101. doi: 10.1016/j.coldregions.2008.12.002.
9. *Marsan D., Weiss J., Moreau L., Gimbert F., Doble M., Larose E., Grangeon J.* Characterizing horizontally-polarized shear and infragravity vibrational modes in the Arctic sea ice cover using correlation methods. *J. Acoust. Soc. Am.* 2019, 145 (3): 1600–1608. doi: 10.1121/1.5094343.
10. *Smirnov V.N., Kovalev S.M., Niubom A.A.* Self-excited oscillations in the drifting ice cover of the Arctic Ocean. *Okeanologicheskie issledovaniia.* Oceanological Research. 2019, 47 (3): 122–138. doi: 10.29006/1564–2291.JOR–2019.47(3).11. [In Russian].
11. *Smirnov V.N., Kovalev S.M., Nubom A.A., Znamenskij M.S.* Mechanics of oscillations and waves in the ice of the Arctic ocean during compression and ridging. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 321–336. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-321-336. [In Russian].
12. *Schmithüsen H.* Continuous meteorological surface measurement during POLARSTERN cruise PS122/4. 2021. Available at: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.935224> (accessed 04.04.2022).